4Д

УДК 535.317:004.22

А.А. Дудкин, А.В. Инютин, А.В. Отвагин
Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
doudkin@newman.bas-net.by, avin@lsi.bas-net.by, forlelik@yahoo.com

Моделирование процессов фотолитографии на суперкомпьютере СКИФ К-1000

Разработана параллельная реализация моделирования процессов фотолитографии для применения на суперкомпьютере СКИФ К-1000. Использование параллельных средств вычисления позволило получить хорошие результаты по ускорению процесса формирования изображения в слое фоторезиста и последующего автоматического контроля оригиналов топологии.

Процесс фотолитографии является основным этапом переноса топологии шаблона на поверхность полупроводниковой пластины. По фотошаблонам, полученным с помощью САПР СБИС, изготавливаются стеклянные фотомаски (оригиналы топологии, одна для каждого слоя микросхемы), которые затем проецируются на фоторезист. После экспозиции на поверхности фоторезиста образуется изображение (так называемое «воздушное изображение»), интенсивность которого зависит от характеристик освещения (длины волны, когерентных свойств освещения), от характеристик маски (размер и форма элементов, комплексная функция пропускания) и от характеристик проекционного объектива (числовая апертура и форма зрачка, амплитудное пропускание и аберрации). Далее в результате сложного процесса взаимодействия света с веществом фоторезиста образуется скрытое изображение, структура которого определяется набором оптико-физических параметров фоторезиста.

В настоящее время известен ряд программных комплексов моделирования процессов фотолитографии (ПК МПФ), реализованных как на кластерах персональных ЭВМ и рабочих станций, так и на многопроцессорных ЭВМ [1-3]. Однако высокая стоимость указанных систем ограничивает их применение. В странах СНГ и в Республике Беларусь нет аналогов ПК МПФ для многопроцессорных вычислительных комплексов.

В ОИПИ НАН Беларуси совместно с КБТМ-ОМО концерна «Планар» в рамках научно-технической программы Союзного государства «Развитие и внедрение в государствах-участниках союзного государства наукоёмких компьютерных технологий на базе мультипроцессорных вычислительных систем» («ТРИАДА») [4] разрабатывается ПК МПФ для систем автоматического контроля оригиналов топологии СБИС, ориентированный на кластерные высокопроизводительные мультипроцессорные вычислительные системы. В настоящей работе рассматривается реализация параллельной обработки для моделирования процессов формирования изображения в фоторезисте полупроводниковой пластины при фотолитографии. В качестве объекта обработки выступают оригиналы топологии – фотомаски СБИС. Обработка заключается в формировании изображения на слое фоторезиста для последующего автоматического контроля оригиналов топологии и коррекции тех дефектов, которые проявятся потом на полупроводниковой пластине, т.е. фотолитографически значимых дефектов [5], [6].

Задачей моделирования процессов формирования изображений является вычисление распределения интенсивности «воздушного» изображения и получение скрытого изображения по заданным оптико-физическим свойствам фоторезиста, известным характеристикам оптической системы и условиям освещения. Вычислительной платформой для ПК МПФ является суперкомпьютер «СКИФ К-1000», расположенный в Объединенном институте проблем информатики НАН Беларуси [7], [8].

Алгоритм моделирования изображения на поверхности фоторезиста состоит из следующих этапов [9-11]:

– вычисления зрачковой функции;
– вычисления векторной амплитуды объекта;
– вычисления передаточной матрицы проекционного объектива;
– вычисления двухмерного распределения интенсивности в заданном положении плоскости;
– вычисления двухмерного распределения интенсивности в разных положениях плоскости;
– расчета интенсивности изображения в частично-когерентном свете;
– вычисление объемного распределения интенсивности.

Алгоритм моделирования изображения в фоторезисте состоит из следующих программных модулей:

– вычисления прошедшей интенсивности в начале экспозиции;
– вычисления поглощенной интенсивности в начале экспозиции;
– вычисления прошедшей интенсивности в конце экспозиции;
– вычисления поглощенной интенсивности в конце экспозиции.

Моделирование процесса фотолитографии в фоторезисте

Для моделирования будем использовать топологическую структуру следующего вида – квадрат размером 20*20 мкм, разбитый на три равные части. Средняя часть проэкспонирована. Фоторезист UV 210 Shipley (позитивный. λ = 248 НМ).

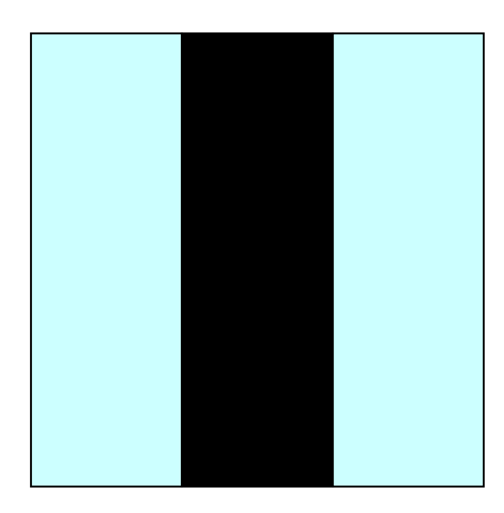
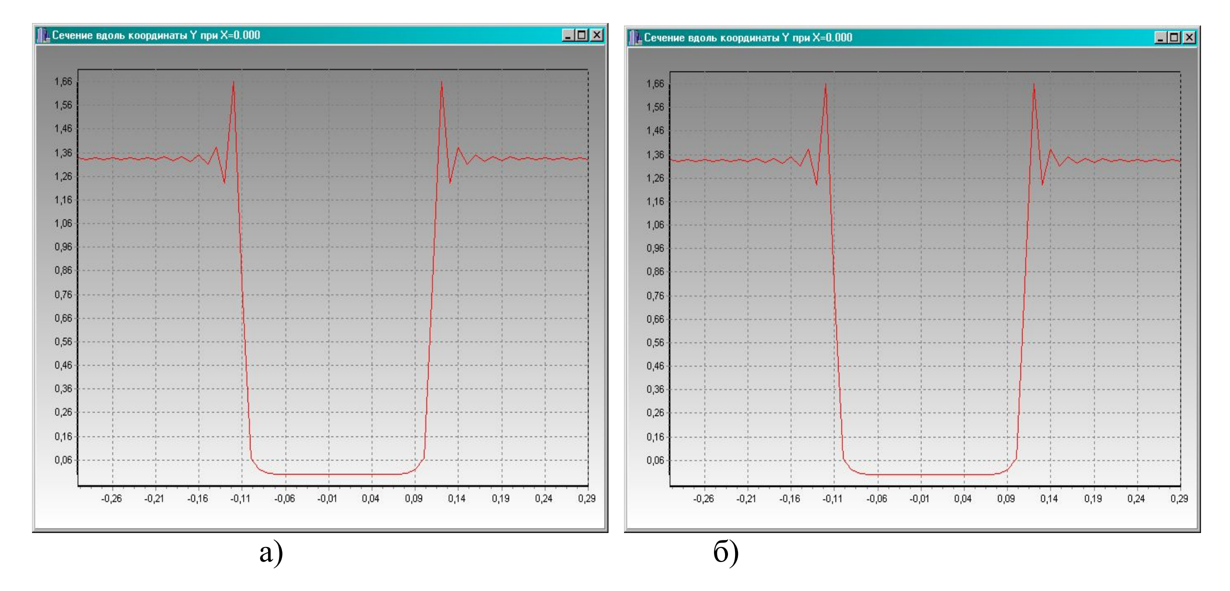


Рисунок 1 – Пример топологической структуры для тестирования



а) б)

Рисунок 2 – Результаты моделирования: а) начало экспозиции, сечение вдоль координаты Y, б) конец экспозиции, сечение вдоль координаты Y

Результаты процесса моделирования для топологической структуры, показанной на рис. 1, приведены на рис. 2. На нем показано распределение интенсивности излучения в фоторезисте. Ось X – расстояние от центральной точки объекта, ось Y – значение интенсивности излучения.

Реализация алгоритма построения и анализа изображений в фоторезисте в виде однопроцессного приложения показала, что при больших объемах исходных данных время обработки и построения модельного изображения является неприемлемо большим (свыше 1 мин./кадр). Так как все исходные объекты обрабатываются по единой программе и могут предъявляться системе поиска дефектов одновременно, целесообразным является использование параллельной вычислительной системы для одновременной обработки потока исходных данных.

Поскольку алгоритм построения изображения является нелинейным, то лучшим способом его параллелизации будет разделение всего алгоритма на отдельные неделимые операции, которые формируют граф приложения (сценарий обработки данных). Этот сценарий реализуется для каждого объекта данных, то есть одновременно в системе может находиться несколько объектов на разных стадиях обработки.

Каждая операция параллельного алгоритма реализована в виде функции с фиксированным количеством входов и выходов, что позволяет конструировать алгоритм из программных компонентов, определяя информационные связи между ними. Операции выполняются отдельными процессорами вычислительной системы, при этом их распределение по процессорам определяет расписание для полученной параллельной программы. Операции, реализованные в виде программных компонент, могут быть легко включены в последовательные приложения.

При исследовании параллельного приложения были проведены эксперименты по измерению производительности в зависимости от количества использованных процессоров, а также в зависимости от исходных данных (размера исследуемого фотошаблона).

Первая группа экспериментов показывает зависимость скорости обработки 50 объектов данных от количества процессоров, выделенных для запуска приложения.

Таблица 1 – Время вычисления для разного количества процессоров

Количество объектов	Количество процессоров			
	1	2	3	4
50	77,8	44,67	41,63	24,48
100	154,92	89,23	83,19	49,51
200	310,11	178,47	166,29	101,42

Как видно из результатов, общее ускорение обработки составляет примерно 3 раза для случая 4 процессоров. Этот результат обусловлен тем, что параллельное приложение имеет нелинейную структуру с различной продолжительностью операций, поэтому его параллелизм также нелинеен. Тем не менее, полученное ускорение позволяет существенно повысить скорость обработки фотошаблонов.

Таблица 2 – Время вычисления для различных входных данных

Количество объектов	Количество точек зрачка		
	50	100	200
100	49,51	156,36	534,56

Вторая группа экспериментов показывает зависимость производительности параллельного приложения от размера входных данных (количество обрабатываемых объектов фиксировано и равно 100, количество процессоров – 4).

Судя по результатам, алгоритм показывает практически линейную масштабируемость. При увеличении количества точек зрачка в 2 раза по координатам X и Y объем данных для обработки увеличивается в 4 раза. При этом время обработки возрастает в 3,16 раза для 100 точек, и в 3,42 раза для 200 точек (относительно времени для 100 точек). Это свидетельствует о хорошей масштабируемости алгоритма, поскольку время работы практически линейно зависит от поступающего объема данных.

Проверка результата функционирования разработанного ПК МПФ проводилась путем сравнения с результатами работы программы SIGMA C на изображениях топологии оригинала, содержащего дефекты стандарта SEMI-P22-0699. Дефекты получены на установке автоматического контроля ЭМ-6329. Результаты моделирования совпали, а следовательно, ПК МПФ функционирует правильно.

Заключение

Разработана параллельная реализация моделирования процессов фотолитографии для применения на суперкомпьютере СКИФ К-1000. Использование параллельных средств вычисления позволило получить хорошие результаты по ускорению процесса формирования изображения в слое фоторезиста и последующего автоматического контроля оригиналов топологии.

Литература

1. Spence C. Full-chip Lithography Simulation and Design analysis – how OPC is changing IC Design / C. Spence // Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 21, iss. 10. – P. 1-14.
2. Poortinga Eric R. Comparing software and hardware simulation tools on an embedded-attenuated PSM / Eric R. Poortinga [et al.] [Electronic resource]. – 2007. – Mode of access: http://www.micromagazine.com/archive/00/06/poortinga.html. – Date of access: 12.07.2008.

3. Optolith – 2D Optical Lithography Simulator [Electronic resource]. – 2005. – Mode of access: http://www.silvaco.com/products/vwf/athena/optolith/optolith_datasheet.html. – Date of access: 11.07.2008.
4. Программа Союзного государства «ТРИАДА» [Electronic resource]. – 2006. – Mode of access: http://supercomp.basnet.by/app_triada_ru.html. – Date of access: 12.07.2008.
5. Аваков С.М. Новые методы и высокопроизводительные алгоритмы детектирования дефектов для модульной платформы автоматического контроля оригиналов топологии СБИС / С.М. Аваков // Инженерный вестник. – 2006. – № 1 (21) / 5. – С. 88-97.
6. Аваков С.М. Автоматический контроль топологии планарных структур / С.М. Аваков. – Минск: ФУАинформ, 2007. – 168 с.
7. Суперкомпьютерные конфигурации СКИФ / Абламейко С.В., Абрамов С.М., Анищенко В.В., Парамонов Н.Н., Чиж О.П. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. - 170 с.
8. Абрамов С.М. и др. Программа Союзного государства «Разработка и освоение в серийном производстве семейства высокопроизводительных вычислительных систем с параллельной архитектурой (суперкомпьютеров) и создание прикладных программно-аппаратных комплексов на их основе: результаты и перспективы» // Вестник связи. - 2001. – № 3. - С. 35-37
9. Sheppard C.J.R., Torok P. Approximate forms for diffraction integrals in high numerical aperture focusing // Optik. – 1997. – Vol. 105, № 2. – P. 77-82.
10. Voznesensky N.B., Belozubov A.V. Polarization effects on image quality of optical systems with high numerical apertures // Proc. SPIE. – 1999. – Vol. 3754. – P.366-373.
11. Вознесенский Н.Б., Белозубов А.В., Вознесенская Н.Н., Виноградова Г.Н. Описание векторного электромагнитного поля в двойном дипольном приближении // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69, № 3. – С. 5-10.

О.А. Дудкін, О.В. Інютін, О.В. Отвагін

Моделювання процесів фотолітографії на суперкомп'ютері СКІФ К-1000

Розроблена паралельна реалізація моделювання процесів фотолітографії для застосування на суперкомп'ютері СКІФ К-1000. Використання паралельних засобів обчислення дозволило одержати добрі результати з прискорення процесу формування зображення в шарі фоторезиста і подальшого автоматичного контролю оригіналів топології.

Alexander Doudkin, Alexander Inyutin, Alexej Otwagin

Modelling of the Photolithography Processes on Supercomputer SKIF К-1000

The parallel realization of modeling of photolithography processes was developed for application on supercomputer SKIF К-1000. Parallel means of calculation have allowed accelerating of image generation process in a photoresist layer and the subsequent automatic mask inspection.

Статья поступила в редакцию 12.08.2008.